

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**РЕЙНТАЛЬ ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА**

**УДК 669-154:532.584:532.695:535.2**

**ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ СУСПЕНЗІЙНИХ ТА ЕМУЛЬСІЙНИХ  
РОЗПЛАВІВ ПРИ ВВЕДЕННІ ДИСПЕРСІЙНИХ ЧАСТИНОК ПІД ДІЄЮ  
ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

**Спеціальність 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки**

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Київ – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі концентрованих енергетичних впливів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
**Лихошва Валерій Петрович,**  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,  
завідувач відділу концентрованих енергетичних впливів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Самотугін Сергій Савелійович,**  
Приазовський державний технічний університет,  
завідувач кафедри наноінженерія в галузевому машинобудуванні

кандидат технічних наук,  
**Бернацький Артемій Володимирович,**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
провідний науковий співробітник відділу №77  
«Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Захист відбудеться «20» квітня 2021р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.15 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», за адресою: 02000, м. Київ, вул. Політехнічна, 39, корпус 23, ауд. 216.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «18» березня 2021р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Пашенко В.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з найбільш важливих завдань машинобудування є підвищення міцності властивостей конструкційних матеріалів. Традиційні методи металознавства дозволяють істотно підвищити міцність металів і сплавів шляхом легування і термомеханічної обробки. Однак ці методи не дають можливості змінити модуль пружності високоміцного матеріалу. Значно розширити експлуатаційні можливості деталей і механізмів дозволяє створення нових матеріалів, які представляють собою композиції з м'якої матриці з розподіленою в ній високоміцною дисперсною фазою. Завдяки величезній номенклатурі матеріалів і можливості комбінування об'ємного вмісту компонентів, залежно від призначення, можливе отримання композитів (КМ) з високими значеннями міцності, жароміцності, модуля пружності, абразивної стійкості і іншими спеціальними властивостями.

На відміну від волокнистих і інших видів КМ перевага дисперсійно-зміцнених композитів полягає в тому, що зміцнення металевої матриці дисперсійними частинками має бути рівномірним. Такі матеріали відрізняються ізотропністю властивостей. До того ж, зазвичай, не потрібно великого процентного вмісту армуючої фази - оптимальний її зміст для різних металів не є однаковим, але не перевищує 5..10 об. %. Дисперсійно-зміцнені композиційні матеріали можуть бути отримані на основі більшості застосовуваних в техніці металів і сплавів.

Серед великої різноманітності методів отримання дисперсійно-зміцнених композиційних матеріалів рідиннофазні методи мають ряд істотних переваг, головні з яких: можливість отримання виробів складної конфігурації з мінімальною наступною обробкою або без неї, висока продуктивність і можливість механізації, реалізація безперервних технологічних процесів. Для отримання рівномірного розподілу дисперсійного матеріалу в розплаві особливий інтерес представляє собою спосіб створення композиційних матеріалів з рідкофазного стану шляхом формування суспензійних і емульсійних розплавів при введенні армуючої складової під дією лазерного випромінювання. Досвід, накопичений дослідниками в цій галузі, показує, що можливості застосування композиційних матеріалів розкриті не повністю, а технологія їх виробництва вимагає подальшого вдосконалення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у Фізико-технологічному інституті НАН України в рамках Державних науково-технічних програм «Дослідження процесів газореагентної взаємодії компонентів в розплаві при концентрованому нагріванні та рідкофазному відновленні металів з низькосортної шихти і техногенних відходів» (№ ДР 0108U004471, 2008-2010 рр.); «Розробка методів одержання та дослідження закономірностей формування багат шарових виробів на основі ливарних технологій і висококонцентрованих джерел енергії» (№ ДР 0111U000081, 2011-2013 рр.); «Дослідження особливостей формування багат шарових виробів на основі ливарних методів та фізико-хімічної обробки, в тому числі з композиційними шарами при різних методах їх одержання» (№ ДР 0112U001231, 2011-2013 рр.); «Розробка науково-технологічних основ отримання багатокомпонентних і композиційних сплавів і виробів з них на основі ливарних процесів з використанням

концентрованих джерел енергії» (№ ДР 0214U002121, 2014-2016 pp.); «Створення науково-технічних засад одержання композиційних матеріалів та багаточастикових виробів з використанням високотемпературних та електромагнітних дій на метал» (№ ДР 0117U002602, 2017-2019 pp.).

**Мета і задачі досліджень.** Мета роботи - дослідження процесу формування дисперсійно-зміцнених композиційних матеріалів на основі суспензійних та/або емульсійних розплавів із застосуванням лазерного випромінювання. Для досягнення мети були поставлені такі наукові задачі:

1. Провести огляд існуючих способів формування дисперсійно-зміцнених композитів та застосування висококонцентрованих джерел енергії в технології їх отримання.

2. Розробити нові методи отримання композиційних матеріалів на основі ливарних процесів із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії.

3. Дослідити газодинамічні та теплофізичні процеси формування двофазного газолазерного потоку в умовах зміни його параметрів. Визначити траєкторії руху і стан його складових до взаємодії з металевим розплавом.

4. Дослідити взаємодію газолазерного двофазного потоку з металевим розплавом та поведінку частинок в умовах руху на границі газ – рідка фаза та в розплаві з урахуванням деформаційних навантажень.

5. Провести експериментальні та теоретичні дослідження впливу технологічних, геометричних та теплофізичних параметрів газопорошкового потоку і лазерного випромінювання на процес формування суспензії/емульсії.

6. Розробити технологію отримання литих композиційних матеріалів на основі суспензійних і емульсійних розплавів. Дослідити структуру та фізико – механічні властивості отриманих композитів.

*Об'єкт дослідження* - спосіб формування литих композиційних матеріалів на основі суспензійних та/або емульсійних розплавів.

*Предмет дослідження* - процеси теплової, газо- і гідродинамічної взаємодії газолазерного потоку, розплаву та дисперсної фази.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач застосовувались такі методи: аналіз сучасних наукових видань, присвячених методам та способам отримання дисперсійно-зміцнених композиційних матеріалів; методи математичного моделювання із застосуванням залежностей теорій гідро- , газодинаміки та теплообміну; при дослідженні структури композитів – якісний рентгенівський фазовий аналіз, металографічний аналіз; метод вимірювання мікротвердості; статистичні методи оцінки розмірів та кількісного вмісту дисперсної складової в композиті.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

В дисертації одержані такі нові наукові результати:

- Вперше розроблено метод отримання дисперсійно – зміцненого литого композиційного матеріалу регульованим введенням у розплав нагрітих у газо – лазерному потоці металевих та неметалевих частинок формуванням суспензійного або емульсійного розплаву з наступним його охолодженням.

- Вперше запропоновано універсальний параметр стану газу – порошкового потоку – миттєва об'ємна концентрація порошкового матеріалу, яка характеризує розподіл частинок у перерізі двофазного потоку. У потоках із сфокусованою геометрією максимум його значень знаходиться у перетяжці газопорошкового потоку, що дозволяє використовувати дану функцію для аналітичного її визначення.

- Встановлено величину занурення частинок у кольорові розплави на основі міді та алюмінію при їхній початковій швидкості 5..25 м/с. Враховуючи поперечне або поздовжнє деформування частинок при їх зіткненні з розплавом, величину занурення або спливання частинок в залежності від їх розміру, відношення густин матеріалів розплаву і частинки та поверхневих сил, сформульовані гідродинамічні та технологічні умови формування суспензій/емульсій.

- Визначено, що дія лазерного випромінювання на частинки та поверхню розплаву сприяє підвищенню взаємодії частинок з рідким металом, при цьому одночасно викликає структурні зміни у розплаві (подрібнення структури, посилення міжфазної взаємодії, розпад або утворення нових фаз, інтенсифікацію дифузійних та масо переносних процесів).

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено технологічне обладнання для подачі дисперсійного матеріалу в зону обробки лазерним променем, що є універсальним для таких процесів обробки матеріалів, як лазерне наплавлення, 3D-прототипування, напилення, отримання композитів;

- визначені режими лазерного нагріву частинок за умов різної запиленості газопорошкового потоку;

- отримані нові литі композиційні матеріали на основі алюмінієвого сплаву АК12М2МГН з неметалевими включеннями  $Al_2O_3$ , TiC та FeS та композити на основі міді та бронзи ОЦС 3-8-6 з включеннями зі сталі марки 09Х18.

**Особистий внесок здобувача.** В дисертаційній роботі вклад автора полягає у обґрунтуванні мети роботи та постановці задач досліджень, розробці методики та плануванні експериментів; проведенні математичного моделювання стадій формування суспензійних і емульсійних розплавів [5-7, 9, 11, 19, 21, 22]; обробці, аналізі та узагальненні результатів досліджень; розробці рекомендацій щодо раціональних режимів технологічного процесу. Спільно у співавторстві автор брав участь у розробці технологічного обладнання [3-5, 7, 15, 16, 19] та способу отримання литих дисперсійно-зміцнених композитів під дією лазерного випромінювання [2, 6, 14, 17, 18]; дослідженні впливу дії лазерного випромінювання на сплави у рідкому, рідко-твердому та твердому стані [1, 12, 20]; проведенні експериментальних та теоретичних досліджень отримання литих композиційних матеріалів [2-4, 6, 8, 10, 13].

**Апробація роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства» (Севастополь, 2008 р.); «Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкций» (Севастополь, 2010 р.); «Литье-2011» (Запоріжжя, 2011 р.); «Перспективные материалы, покрытия и

технологии. Предельные состояния элементов конструкций» (Севастополь, 2011 р.); «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология» (Київ, 2011 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 22 наукові праці, у тому числі, 13 статей у наукових фахових виданнях (з яких 2 статті у виданні іноземної держави та 1 стаття у іноземному виданні, що входить до БД Scopus), 4 патента України на корисну модель, 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура й об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина дисертації представлена на 116 сторінках тексту і містить 43 рисунки та 13 таблиць. Загальний об'єм дисертації становить 131 сторінка, у тому числі список використаних джерел із 101 найменування на 11 сторінках та 1 додаток на 4 сторінках.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, зазначені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, відзначено особистий внесок дисертанта у виконанні роботи. Наведені відомості про апробацію результатів роботи та кількість публікацій за темою дисертації.

У першому розділі наведено огляд сучасних наукових праць стосовно розширення та поліпшення експлуатаційних властивостей деталей і механізмів, зокрема шляхом створення нових композиційних матеріалів. Відзначено переваги композиційних матеріалів порівняно зі звичайними конструкційними матеріалами завдяки їхнім підвищеним триботехнічним, жароміцним та іншим спеціальним властивостям. Відмічено переваги дисперсійно-зміцнених композитів у порівнянні з іншими КМ, такі як ізотропія властивостей; можливість їхнього отримання на основі більшості застосовуваних в техніці металів і сплавів; невеликий вміст дисперсної фази, який зазвичай не перевищує 5..10 об. % металевої матриці. Розглянуті методи отримання металевих дисперсійно-зміцнених композитів та зроблено висновок про переваги рідиннофазних методів перед іншими методами отримання композитів, головними з яких є: можливість отримання виробів складної конфігурації з мінімальною наступною обробкою або без неї; обмежений силовий вплив на крихкі компоненти; широка номенклатура застосовуваних матеріалів; висока продуктивність; можливість механізації та реалізації безперервних технологічних процесів.

У другому розділі визначено матеріали, обладнання, обрані методики проведення теоретичних та експериментальних досліджень.

У роботі було використано експериментальну установку, яка складається з лазерного модулю, роботизованої системи подачі, фокусування і переміщення лазерного променя, системи подачі порошкового матеріалу, набору фурм та індукційної печі. Лазерний модуль представляє собою СО<sub>2</sub>-лазер із плавним регулюванням потужності в межах 200..1000 кВт. Схему установки для проведення експериментів представлено на рисунку 1. У якості матеріалів металевої матриці були обрані алюмінієвий сплав АК12М2МгН, бронзи ОЦС 3-8-6, ОЦС 5-5-5 і лита мідь. Дисперсна фаза представлена керамічними частинками складів TiC, FeS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

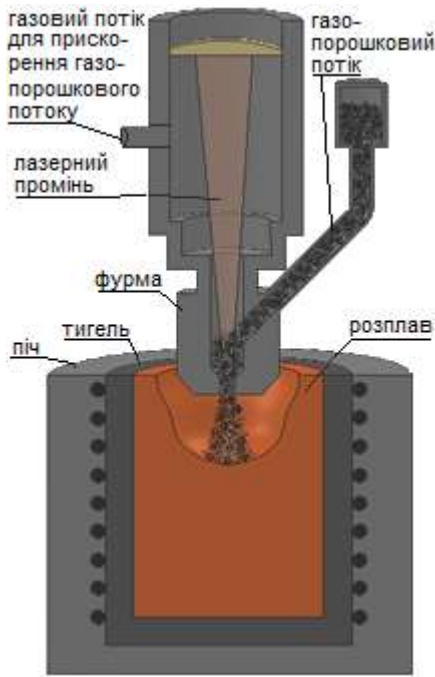


Рис. 1. Схема експериментальної установки з фурмою.

та металевими частинками зі сталі марки 09X18. Додавання до матриці порошків  $Al_2O_3$  та  $TiC$  надає їй високих фрикційних властивостей, а порошок складу  $FeS$  захищає фрикційний матеріал від надмірного зношування. Застосування порошку зі сталі марки 09X18 надають композиційному матеріалу високих значень твердості та зносостійкості.

Визначено дві принципові схеми проведення досліджень по отриманню литих КМ: подача дисперсної фази на поверхню розплаву та із заглибленням фурми у рідку матрицю (рис.2). Основними технологічними параметрами, що впливають на характеристики одержуваного композиційного матеріалу є: потужність лазерного випромінювання  $P$ ; діаметр плями лазерного випромінювання  $d_n$ ; витрата прискорюючого захисного  $Q_{пр}$  і транспортуючого потоків газу  $Q_T$ ; об'ємна витрата сипучих матеріалів  $Q_n$ ; відстань від зрізу фурми до поверхні розплавленого металу або рідини (за відсутності дії газових потоків)  $H$ .

Для вивчення принципів формування газопорошкових потоків були розроблені декілька конструкцій фурм, призначених для подачі і контрольованого нагрівання порошкових матеріалів під впливом лазерного випромінювання.

Фурми відрізняються розташуванням області формування газопорошкового потоку – вона знаходиться всередині фурми або за її межами, кількістю бічних каналів – одним (рис. 3 а, б) або двома (рис. 3 в, г, д, е) та довжиною внутрішнього каналу. Фурми №5 та №6 мають подовжену конструкцію внутрішнього каналу (рис. 3 д, е).

Методика проведення математичних розрахунків газодинамічних параметрів

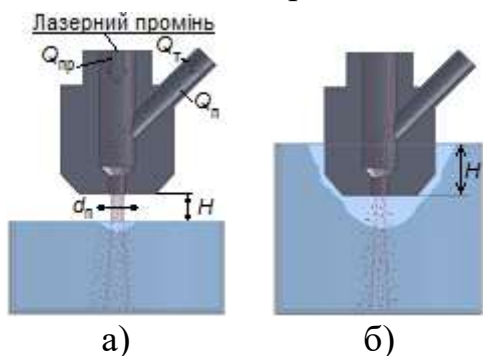


Рис. 2. Схеми проведення експериментів з отримання суспензійних матеріалів: а - подача порошку на поверхню розплаву; б - із заглибленням фурми в розплав.

газопорошкового потоку та гідродинамічних параметрів модельних рідин та розплавів при взаємодії з газопорошковими потоками базується на вирішенні усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності із застосуванням методу скінченних елементів у аналітичному модулі CFX програмного комплексу ANSYS.

Методика розрахунків параметрів руху дисперсної частинки, прискореної газовим потоком до певної швидкості, при її перетині границі газ – рідке середовище з урахуванням деформації та подальшому русі у рідині до моменту її гальмування базується на застосуванні без сіткового лагранжевого чисельного методу

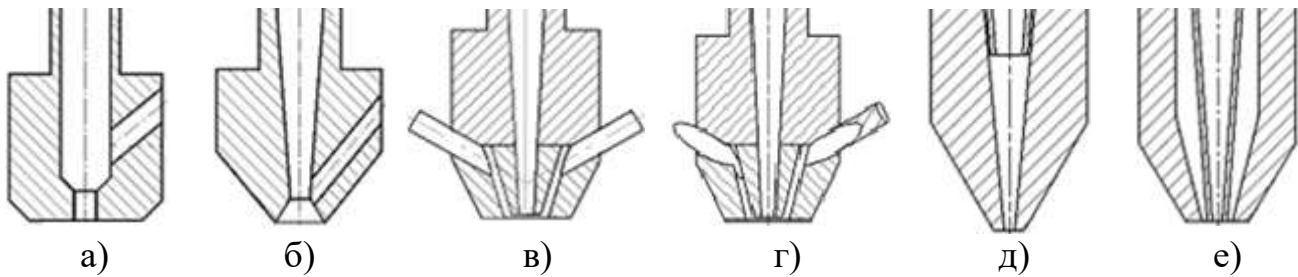


Рис. 3. Конструкції фурм з внутрішнім (а - №1, б - №2, д - №5) і зовнішнім (в - №3, г - №4, е - №6) формуванням потоку.

гідродинаміки згладжених частинок.

Сталу швидкість осадження (або спливання) частинки  $v_{oc}$  обчислювали за формулою Стокса.

Металографічні дослідження проводилися на шліфах зразків з використанням мікроскопу «МІМ – 8» при збільшеннях від 100 до 500.

Статистичний метод оцінки кількісних і якісних параметрів включень в КМ базувався на вираховуванні параметрів двовимірної структури (довжини, ширини, площі включень, та форм - фактору, який є відношенням довжини включення до його ширини) на поверхні шліфа та порівнянні цих параметрів на різних перерізах одного зразка або на одному перерізі при різних умовах зовнішнього впливу на зразки.

У третьому розділі наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень етапів формування дисперсійно-зміцнених литих композиційних матеріалів.

Досліджено вплив дисперсної фази на характер розповсюдження газових потоків у фурмах. За математичними розрахунками газові потоки у всіх досліджуваних фурмах за відсутності подачі порошку є турбулентними: значення чисел Рейнольдса для досліджуваних фурм при загальній витраті газу  $Q_r = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Q_r = Q_{пр} + Q_r$ ) є відрізняються незначним чином (табл. 1).

Табл. 1. Розраховані значення чисел Рейнольдса у вихідних каналах фурм при витраті газу  $Q_c = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Фурма	1	2	3	4	5	6
Число Рейнольдса	5606	5225	5800	5648	5485	5545

Вплив дисперсійної фази на розвиток турбулентності в газовому середовищі визначали за допомогою імпульсного числа частки  $Pa_{Re}$  та числа Рейнольдса для середовища  $Re_L$ .

$$Pa_{Re} = \frac{1}{18} \frac{Re_L^2}{Re_q} \frac{\rho_q}{\rho_p} \left( \frac{d_q}{L_T} \right)^3, \quad Re_L = \frac{v_r D_r}{\nu}, \quad Re_q = \frac{Ar_q (1-\beta)^{4,8}}{18 + 0,61(1-\beta)^{3,3} \sqrt{Ar_q \left[ 1 + \frac{(\rho_q - \rho_p)\beta}{\rho_p} \right]}},$$

$$Ar_q = \frac{d_q^3 g (\rho_q - \rho_p)}{\nu^2 \rho_p}, \quad \beta = \frac{V_{п}}{V_{п} + V_r} = \frac{Q_{п}}{Q_{п} + Q_r} = \frac{v_{п} \cdot S_{п}}{v_{п} \cdot S_{п} + v_r \cdot S_r}.$$

де  $Re_q$  – число Рейнольдса дисперсної частинки,  $\rho_q$  – щільність частинки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_p$  – щільність потоку газу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $d_q$  – характерний розмір частинки (її діаметр), м;  $L_T$  – характерний розмір турбулентного середовища, м;  $D_r$  – гідравлічний діаметр фурми, м;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $Ar_q$  – критерій Архімеда для твердої компоненти;  $\beta$  – миттєва об'ємна концентрація частинок у потоці;  $V_{п}$  –



об'єм порошку,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{г}}$  – об'єм газу,  $\text{м}^3$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $v_{\text{п}}$  – швидкість порошкового потоку,  $\text{м/с}$ ;  $v_{\text{г}}$  – швидкість газового потоку,  $\text{м/с}$ ;  $S_{\text{п}}$  – площа поперечного перетину порошкового потоку,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\text{г}}$  – площа поперечного перетину газового потоку,  $\text{м}^2$ .

При значеннях  $Re_L < 1,5 \cdot 10^3 \cdot Pa_{Re}^{1/2}$  відбувається посилення турбулентності газопорошкового потоку, а при  $Re_L > 1,5 \cdot 10^3 \cdot Pa_{Re}^{1/2}$  – її ослаблення. Визначено, що зменшення турбулентних зон можна домогтися збільшенням діаметра вихідного каналу фурми, а збільшення інших параметрів ( $\rho_{\text{ч}}$ ,  $d_{\text{ч}}$ ,  $v_{\text{г}}$ ) призводить до посилення турбулентності газопорошкового потоку (рис. 4, 5).

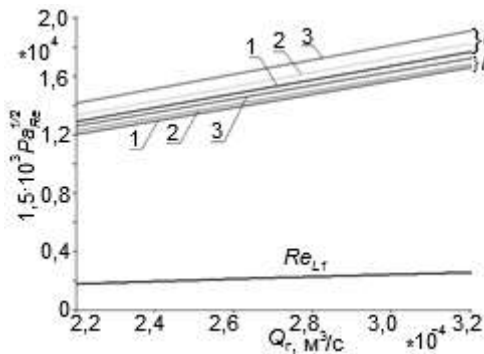


Рис. 4. Вплив щільності частинки на турбулентність потоку;  $\rho_1 = 3970 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_2 = 7750 \text{ кг/м}^3$ ,  $1 - Q_{\text{п}} = 1,16 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $2 - Q_{\text{п}} = 3,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $3 - Q_{\text{п}} = 8,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $d_{\text{ч}} = 100 \text{ мкм}$ , число  $Re_{L1}$  розраховане для значення  $D = 12 \text{ мм}$ .

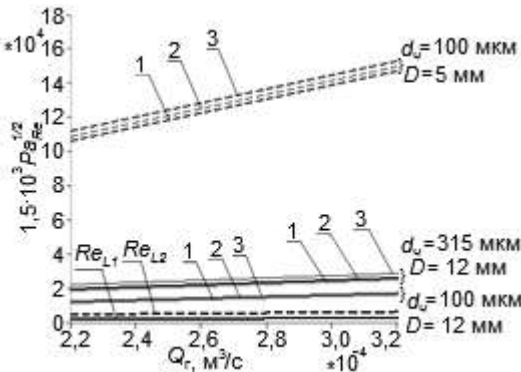


Рис. 5. Вплив діаметра частинки і діаметра фурми на турбулентність потоку;  $1 - Q_{\text{п}} = 1,16 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $2 - Q_{\text{п}} = 3,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $3 - Q_{\text{п}} = 8,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\rho = 3970 \text{ кг/м}^3$ ,  $Re_{L2}$  розраховане для значення  $D = 5 \text{ мм}$ .

Критерієм оптимальної подачі дисперсної складової в зону впливу лазерного променя є формування сфокусованого газопорошкового потоку в фокальній площині лазерного випромінювання та його відповідність апертурі лазерного променя.

Отримано експериментальні дані геометрії областей розподілу керамічних  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (рис. 6, 7) та сталевих частинок 09X18 (рис. 8, 9) при їх подачі на поверхню води на відстані  $H = 15 \text{ мм}$  (рис. 6, 8) та  $H = 33 \text{ мм}$  (рис. 7, 9) та витраті газу  $Q_{\text{г}} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Встановлено, що фурми №№ 1, 2, 5 утворюють доволі сконцентровані газопорошкові потоки у порівнянні з фурмами №№ 3, 4, 6. Для цих фурм із збільшенням відстані  $H$  розпилення частинок порошку майже не відбувається (рис. 7, 9 а, б, д). А фурми із зовнішнім формуванням (№№ 3, 4, 6) сприяють розпиленню порошку по оброблюваній поверхні, причому концентрація частинок уздовж центральної вісі може бути менша за периферійну (рис. 7, 9 в, г, е), що впливає на ефективність нагріву всього об'єму порошку.

Експериментальні методи дослідження формування порошкових матеріалів за допомогою різних фурм дозволяють візуально і якісно оцінити характер просторового розподілу порошку на деякій відстані і тільки за її межами.

Використання параметру  $\beta$  дозволяє аналітичним чином дослідити характер утворюваних потоків та точно визначити місце перетяжки газопорошкового потоку  $f$ .



Рис. 6. Профілі областей розподілу частинок порошку  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в воді,  $H = 15$  мм: а – фурма №1, б – фурма №2, в – фурма №3, г – фурма №4, д – фурма №5, е – фурма №6.



Рис. 7. Профілі областей розподілу частинок порошку  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в воді,  $H = 33$  мм: а – фурма №1, б – фурма №2, в – фурма №3, г – фурма №4, д – фурма №5, е – фурма №6.



Рис. 8. Профілі областей розподілу частинок порошку 09X18 в воді,  $H = 15$  мм: а – фурма №1, б – фурма №2, в – фурма №3, г – фурма №4, д – фурма №5, е – фурма №6.

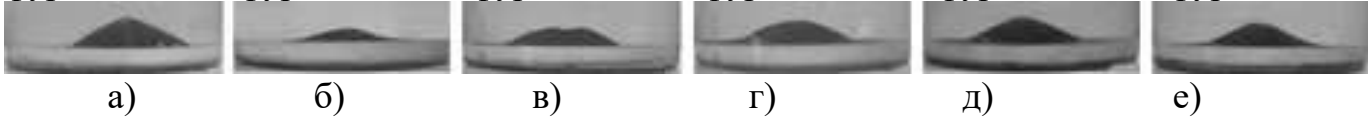


Рис. 9. Профілі областей розподілу частинок порошку 09X18 в воді,  $H = 33$  мм: а – фурма №1, б – фурма №2, в – фурма №3, г – фурма №4, д – фурма №5, е – фурма №6.

Проведені розрахунки миттєвої об'ємної концентрації порошку у газопорошковому потоці  $\beta$  всередині фурм та за їхніми межами.

Розрахунки  $\beta$  підтверджують експериментальні дані щодо більшої концентрації газопорошкових потоків фурмами №№ 1, 2, 5 (рис. 10, лінії 1, 2, 5), ніж фурмами із зовнішньої обробкою (рис. 10, лінії 3, 4, 6). Відмінність між фурмами 1, 2 та 5 – в довжині ділянки внутрішнього каналу, де формується порошковий потік. В результаті фурма 1 формує на виході сфокусований порошковий потік, не змінюючи початкову концентрацію дисперсних частинок в газі  $\beta_{\text{поч}}$ . Фурма 5 має найбільш подовжену конструкцію, в результаті всередині такої фурми створюється

більш концентрований потік з концентрацією частинок у фокусі лазерного променя  $\beta_{\text{ф}}$ , що перевищує  $\beta_{\text{поч}}$  в 2,6 разів. Отже, в разі використання фурм 2 і 5 можлива подача менш концентрованого потоку, ніж необхідно в області фокусу.

У фурмах з фокусуванням дисперсного матеріалу за її межами (рис. 10, лінії 3, 4, 6)  $\beta$  і  $\beta_{\text{ф}}$  не досягають значення  $\beta_{\text{поч}}$ .

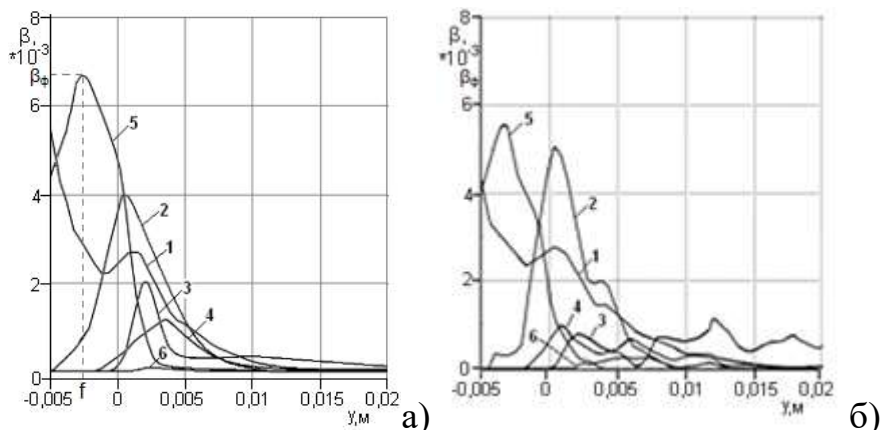


Рис. 10. Зміна об'ємної концентрації частинок порошку 09X18 (а) і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (б) в газопорошковому потоці для різних фурм: 1–фурма №1, 2–фурма №2, 3–фурма №3, 4–фурма №4, 5–фурма №5, 6–фурма №6,  $\beta_{\text{поч}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $Q_{\Gamma} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ .

При подачі дисперсійного матеріалу перпендикулярно внутрішньому каналу (рис. 10, лінія 3)  $\beta_\phi$  більше, ніж для фурми з подачею порошку по дотичній (рис. 10, лінія 4), оскільки в другому випадку на виході формується газопорошковий потік, що обертається, і відцентрова сила, діюча на частинки, сприяє їх розсіюванню відносно центральної вісі фурми. Збільшення довжини фурми, в тому числі і каналу, де формується газопорошковий потік, призводить до збільшення тиску і швидкості потоку, в результаті відцентрова сила зростає і ще більше розсіює частинки на виході. При обробці таких потоків значна частина лазерного випромінювання проходить крізь порошковий потік і крім нагрівання частинок може бути використана для нагріву матеріалу, на який наносять дисперсну складову. Недоліком даних пристроїв є неефективне використання легуючих елементів внаслідок того, що велика кількість порошкового матеріалу розсіюється за межі сфокусованого лазерного випромінювання.

Таким чином, отримані розрахункові значення  $\beta$  дають можливість не тільки точно визначити місце розташування перетяжки порошкового потоку  $f$  (рис. 10), а й сприяють подальшому прогнозуванню величини і характеру теплового нагріву отриманих порошкових потоків та металевої матриці при їх обробці лазерним випромінюванням. Застосування математичного апарату дозволяє значно скоротити обсяг експериментальних робіт.

Проведені експериментальні дослідження (рис. 11 а, в) та розрахунки (рис. 11 б, г) зміни форми та глибини газової каверни  $L$  при заглибленні (рис. 11 а, б) та без заглиблення (рис. 11 в, г) фурм у модельну рідину в залежності від їх конструкцій та

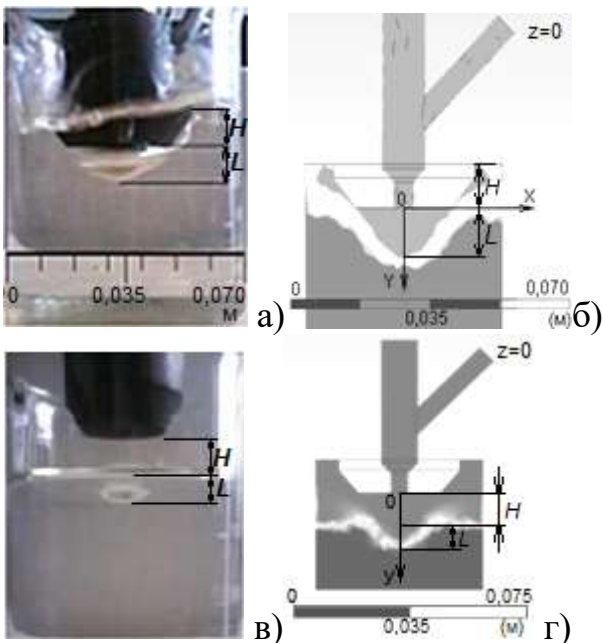


Рис. 11. Газова каверна при заглибленні фурми №1 у рідину (а, б) та без заглиблення фурми (в, г),  $H = 10$  мм: а, в – фото експерименту; б, г – розрахункові дані; швидкість прискорюючого потоку газу  $v_{пр} = 2,93$  м/с.

швидкості прискорюючого газового потоку  $v_{пр}$ , значення якого лежить в межах від 2,93 до 3,85 м/с. Отримано хорошу збіжність отриманих експериментальних та розрахункових даних. Визначені максимальні значення швидкостей газових потоків на виході з фурм  $v_f$  та глибин каверн  $L$  (табл.2).

Встановлено, що фурми 1, 2, 3 та 4 доцільно застосовувати для робочої зони (області, де формується суспензійний розплав), глибина якої не перевищує 2 - 13 мм. При потребі розширення діапазону розмірів робочої зони більш ефективно використовувати фурми 5 та 6. При використанні фурми 2 глибина каверни при підвищенні витрати газового потоку майже не змінюється, оскільки газовий струмінь потрапляє на поверхню рідини під кутом і розсіюється. При заглибленні фурм 5 та 6 підвищення швидкостей газових потоків понад 2,93 м/с з метою збільшення глибини каверни є нераціональним, оскільки при

подальшому зростанні  $v_{\text{пр}}$  відбувається інтенсифікація турбулентних течій, внаслідок чого розмір газових каверн зменшується. Це дозволяє проводити обробку матеріалів з використанням фурм 5 та 6 при менших витратах газу і утворенням

Таблиця 2. Значення глибин газових каверн та швидкостей газових потоків при виході з фурм в межах  $v_{\text{пр}}$  від 2,93 до 3,85 м/с,  $H = 10$  мм.

№ фурми	Глибина каверни $L$ , мм		Швидкість газу на виході з фурми $v_r$ , м/с	
	Незаглиб- лена фурма	Заглиблена фурма	Незаглиб- лена фурма	Заглиблена фурма
1	2,5-6	7-13	15-19	14-18
2	2-3	3-4	14,5-19	14-17
3	2-6	7-13	18-24	16-21
4	3-6	8-11	18-24	15-20
5	13-20	30-20	22-29	13-25
6	63-85	90-60	170-220	160-210

більш глибокої каверни.

Заглиблення фурми у рідину сприяє збільшенню глибин каверн у всіх випадках у порівнянні із незаглибленим потоком при незначній втраті швидкості. Отже, використання методу заглиблення фурми більш ефективне ніж подача газового потоку на поверхню рідини.

Досліджено вплив величини заглиблення

фурми в різні рідкі середовища на форму і величину каверни при різних значеннях  $v_{\text{пр}}$  (рис. 12). Зі збільшенням динамічної в'язкості матеріалу глибина газової каверни зменшується. Зі збільшенням величини заглиблення фурми у металеві розплави каверна стає більш вузькою і глибокою, її зростання відбувається в діапазоні значень  $H$  від 10 до 20 мм.

Заглиблення лазерної фурми в розплави понад 20 мм веде до зменшення геометричних параметрів газової каверни (як її ширини, так і глибини). Таким чином, оптимальне значення  $H$  для різних величин газового потоку лежить в межах 15 - 20 мм (рис. 12).

Важливим фактором при формуванні композиту з рівномірно розподіленою дисперсійною складовою у всьому об'ємі металевої матриці є час існування стійкої суспензії, який визначається швидкістю та часом осадження або спливання дисперсійного матеріалу в розплаві. У зв'язку з цим було досліджено поведінку дисперсних частинок, які транспортуються з фурми газопорошковим потоком у рідкий розплав та розраховані залежності швидкостей  $v_{\text{ч}}$  та глибин осадження або спливання частинок порошку  $l$  від часу.

Рух окремої частинки розглядали на двох етапах. Спочатку частинка при перетині границі газ – рідина рухається з початковою швидкістю  $v_{\text{ч}}^0$  до моменту її гальмування, коли прискорення частинки стає рівним нулю (перший етап, рис. 13). Далі вона продовжує свій рух рівномірно з постійною швидкістю  $v_{\text{ос}}$  (другий етап).

Залежно від матеріалу частинки, її

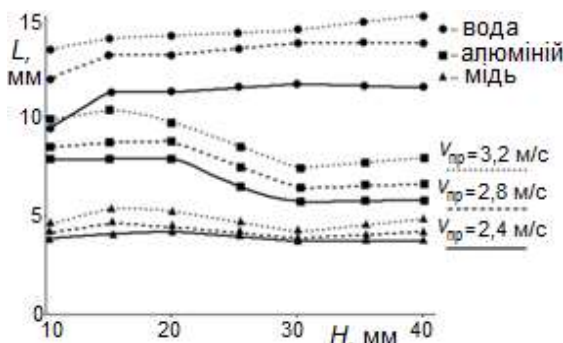


Рис. 12. Залежність глибини газової каверни в рідких середовищах від  $H$  та  $v_{\text{пр}}$ .



розміру і властивостей середовища вона буде або опускатися на дно, або спливати.

Швидкість  $v_{oc}$  розраховували за формулою Стокса: 
$$v_{oc} = \frac{d_q^2(\rho_q - \rho_p)g}{18\mu}.$$

Встановлено, що зменшення швидкості від  $v_q^0$  до  $v_k$  (швидкість наприкінці першого етапу руху) відбувається протягом дуже короткого проміжку часу 0,05..

3,85 мс (рис. 14 а, б). Значення глибин занурення частинок у розплав при їхній початковій швидкості 15 м/с коливаються в межах 0,3.. 3,5 мм та для  $v_q^0 = 25$  м/с – 0,7..3,8 мм (рис. 14 в).

Для частинок, щільність яких менше щільності рідини, розраховували час їх спливання після досягнення швидкості  $v_k$  у поверхневий шар середовища, ширина якого не менше діаметра частинки. Металева частинка зі сталі 09Х18 у розплаві міді досягає поверхневого шару за 0,08 с, а частинки складу  $Fe_3O_4$  і суміші  $Fe_3O_4 + TiC$  у розплаві бронзи - за 0,12..0,15 с.

Для частинок, щільність яких більше за щільність рідини, швидкість заглиблення всередину розплаву складає 2,4..3,3 см/с.

Отже, для розплавів міді та бронзи ОЦС 3-8-6 застосування порошків  $Fe_3O_4$ , суміші  $Fe_3O_4 + TiC$  та сталі 09Х18 у вигляді композитних складових обмежене процесами

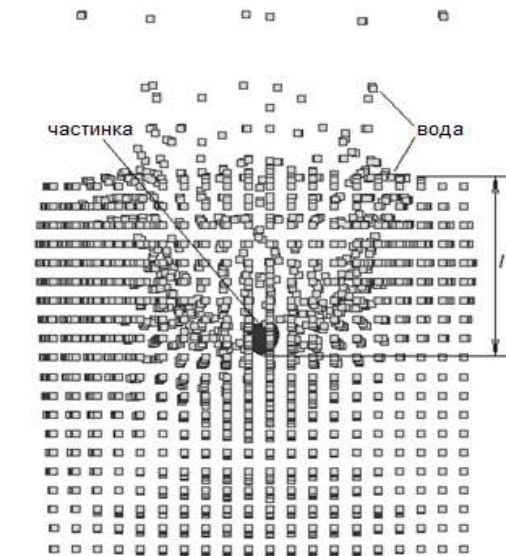


Рис. 13. Рух модельної частинки з склопластику дисперсністю 170 мкм у воді у момент часу  $t = 0,54$  мс;  $l = 1,06$  мм;  $v_q^0 = 15$  м/с.

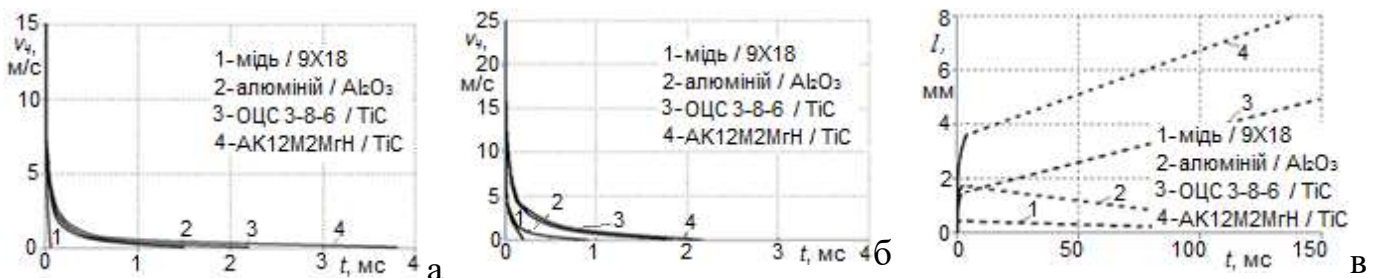


Рис.14. Зміна швидкості руху частинок на першій стадії занурення в рідину: а -  $v_q^0 = 15$  м/с, б -  $v_q^0 = 25$  м/с; в - зміна глибини занурення частинок  $l$  в часі на першій стадії руху (суцільні лінії) і при русі в полі дії гідростатичних сил зі швидкістю  $v_{oc}$  (пунктирні лінії),  $v_q^0 = 15$  м/с.

лазерного наплавлення і легування. Для отримання литих композиційних матеріалів на основі стійкого суспензійного розплаву потрібно застосовувати метод заглиблення фурми у розплав. Також зниження швидкості осадження можливо досягти за допомогою використання додаткового зовнішнього впливу. Це можуть бути відцентрові сили або застосування магнітного поля як, наприклад, сепаратора сталевих частинок в алюмінієвих або мідних розплавах внаслідок різниці електропровідних характеристик матеріалів (розплаву і частинок). Отримані дані дозволяють сформулювати гідродинамічні умови підбору матеріалу розплаву і введених частинок, а також обрати метод одержання виробів з композиційного

матеріалу, як, наприклад, виробів з композиційним лазерним наплавленням або об'ємного литого композиту.

У четвертому розділі проведені дослідження впливу дії лазерного випромінювання на поверхню розплаву, сумісної обробки заглибленого газового потоку і лазерного опромінювання (газолазерного потоку), незаглибленого або заглибленого газопорошкового потоку в умовах одночасного лазерного опромінювання на стан границь зерен та структуру литих суспензійних сплавів.

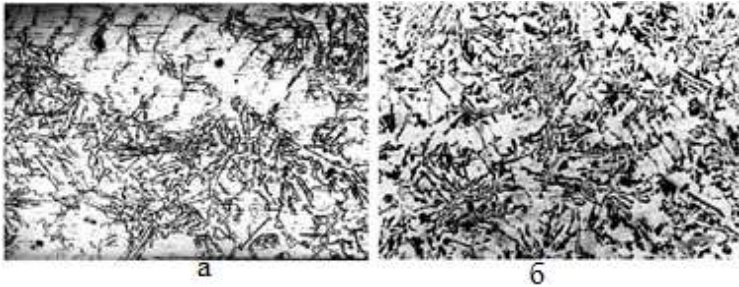


Рис.15. Мікроструктура сплаву АК12М2МгН: а - в початковому стані після індукційного переплаву, б - після газолазерної обробки через заглиблену фурму.

Експерименти проводили за методикою отримання литих матеріалів, у тому числі композиційних, згідно схеми експериментальної установки (рис.1), де формування розплавів відбувалося в умовах перемішування за рахунок дії електромагнітного поля індукційної печі. З метою дослідження дії газолазерного потоку на структурні зміни литого сплаву АК12М2МгН проведено обробку розплаву газолазерними потоками через заглиблену фурму. У зразках, що не були піддані глибинній газолазерній обробці, структура представлена основною фазою у вигляді великих дендритних формувань на одних ділянках і евтектичних скупчень на інших, нерівномірно розподілених за об'ємом (рис. 15. а). Обробка заглибленим газолазерним потоком призводить до подрібнення структури і більш рівномірному розподілу її складових (рис. 15. б). Відбувається істотне пригнічення росту дендритів основної фази і збільшення розмірів складових евтектики. В основній фазі підвищується вміст таких елементів, як кремній, марганець, мідь та цинк, що позначається на підвищенні твердості сплаву. Результати вимірювань показали підвищення твердості сплаву в 1,3 рази з 700 МПа у відсутності газолазерної обробки до 905 МПа після обробки. Таким чином, глибинна газолазерна обробка розплаву алюмінієвого сплаву АК12М2МгН сприяє інтенсифікації дифузійних і масопереносних процесів в рідкому металі, що виражається в перерозподілі елементів у фазах і, забезпечуючи структурно-фазові зміни в усьому об'ємі розплаву, підвищенню фізико-механічних властивостей сплаву.

Проведені дослідження по визначенню ефективності дії лазерного випромінювання на стан границь зерен та структурні зміни в металевих суспензіях, отриманих методом механічного замішування в розплав алюмінію його оксидів.

Вивчена динаміка зміни стану границь зерен і розподілу  $Al_2O_3$  від тривалості лазерного опромінення поверхні суспензійного розплаву (рис. 16). У структурі проби відразу після замішування частинок  $Al_2O_3$  в розплав спостерігаються скупчення частинок по границям зерен. Границі зерен широкі і мають велику протяжність (рис. 16 а).

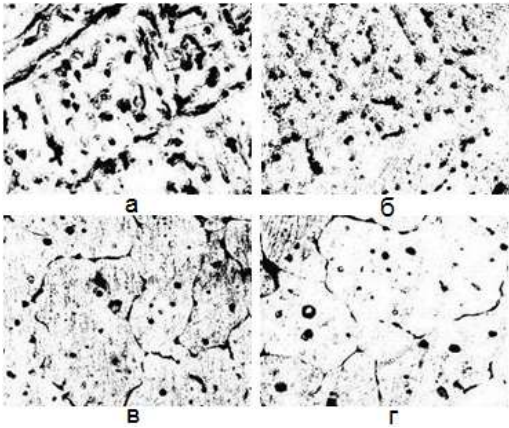


Рис. 16. Динаміка зміни структури, стану границь і розподілу  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в композиційному сплаві на основі алюмінію в залежності від тривалості опромінення поверхні розплаву. Час опромінення: а - без опромінення, б - 1 хв, в - 3 хв, г - 5 хв, х - 500.

Проте введення частинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  сприяло значному подрібненню зерна. Лазерне опромінення протягом 1 хвилини сприяє ще більшому подрібненню зерен, зменшенню товщин їх границь (рис. 16 б). Збільшення тривалості опромінення до трьох хвилин призводить до зростання зерна, значного зменшення границь зерен та розмірів включень і їх глобуляризації, що свідчить про поверхневе підпалвлення частинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  лазерним променем (рис. 16 в).

При цьому зростання зерна супроводжується захопленням деякої маси частинок всередину, що може свідчити про зміну фізичних характеристик розплаву, частинок та їх поверхневого шару. Зміна стану поверхневого шару частинок знижує їх коалесценцію в розплаві та сприяє рівномірному розподілу в об'ємі. Подальше збільшення часу опромінення до 5 хв не призводить до істотних змін границь зерен, а тільки до росту розміру зерна (рис. 16 г). Таким чином встановлено, що тривалість лазерної

обробки суспензійного розплаву понад трьох хвилин не є ефективною.

Спираючись на попередні результати, в роботі проведені дослідження по введенню на поверхню розплаву алюмінієвого сплаву АК12М2МгН частинок карбіду титану і сульфіді заліза з механічним їх замішуванням у розплав (рис. 17 а, рис.18 а), а також з подальшим лазерним опроміненням отриманих суспензійних розплавів протягом 3-х хвилин (рис. 17 б, рис.18 б). Після замішування частинок  $\text{TiC}$  (рис. 17 а) відбувається подрібнення структури і евтектичних колоній, лазерне опромінення сприяє ще більшому подрібненню структури отриманого суспензійного розплаву (рис. 17 б). Розподіл включень має істотні відмінності.

Механічне замішування частинок  $\text{TiC}$  у розплав АК12М2МгН призводить до їх розподілу по границям дендритів і евтектики.

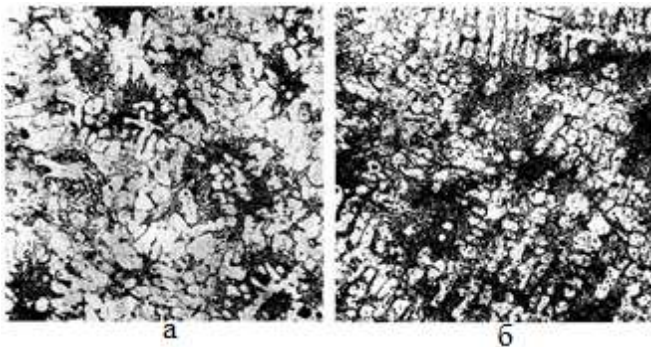


Рис. 17. Мікроструктура сплаву АК12М2МгН з частинками  $\text{TiC}$ : а без лазерного опромінення, б - після опромінення, х - 100.

Лазерне опромінення сприяє рівномірному розподілу включень за всіма складовими та, що дуже важливо, велика частина включень знаходиться всередині основної фази (дендритів). Це забезпечує підвищення твердості композиту.

Введення частинок сульфіді заліза механічним замішуванням в розплав АК12М2МгН значно подрібнює розміри дендритів основної фази (рис. 18 а).



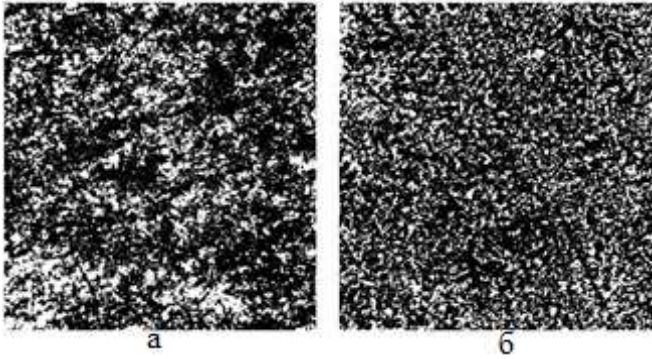


Рис. 18. Мікроструктура сплаву АК12М2МгН з частинками FeS: а - без лазерного опромінення, б - після опромінення, х – 100.

опромінення відбувається оплавлення частинок і трансформація їх поверхневого шару. Встановлено, що опромінені частинки  $Al_2O_3$ , TiC після затвердіння сплаву опиняються всередині дендритів основної фази, що свідчить про їх захоплення зростаючими дендритами при затвердінні, когерентність поверхневого шару частинок основній фазі, внаслідок чого змінюється структурно-фазовий стан матеріалу.

Проведено експерименти з отримання суспензійного розплаву на основі сплаву АК12М2МгН при подачі окислів алюмінію і заліза у газопорошковому потоці на поверхню розплаву під лазерний промінь без заглиблення фурми у розплав. Частинки  $Al_2O_3$  вводили на дзеркало розплаву АК12М2МгН під лазерний промінь з подальшим опроміненням розплаву протягом 5-ти хвилин. Структура

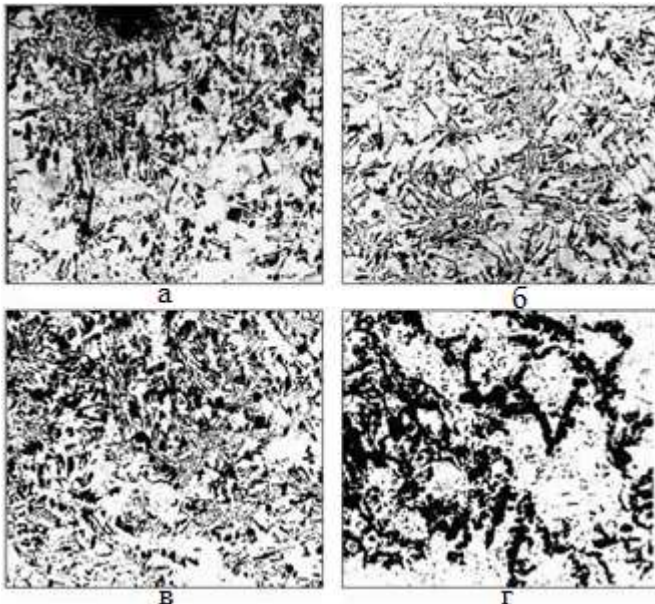


Рис. 19 Мікроструктура злитка литого сплаву АК12М2МгН з введеними частинками  $Al_2O_3$ : а - верхній рівень, б - бокова поверхня злитка, в - середній рівень, г - донна частина злитка, х 100.

Лазерна обробка після введення FeS повністю пригнічує утворення дендритів, сприяє формуванню дрібнодисперсної структури з рівномірним розподілом сульфідів заліза (рис. 18 б).

Таким чином, введення частинок  $Al_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ , TiC і FeS на поверхню розплаву алюмінієвого сплаву АК12М2МгН і подальшого опромінення розплаву сприяє подрібненню структури та евтектичних колоній, їх рівномірному розподілу в злитку. В процесі лазерного

литого сплаву АК12М2МгН з введеними частинками  $Al_2O_3$  складається з твердого розчину алюмінію - світлі кристали (рис. 19), великої кількості голчастої дендрітоподібної евтектики  $\alpha+Si$ , сітчастих темних кристалів  $Mg_2Si$  та невеликих первинних кристалів кремнію (темно-сірого кольору). По всьому перетину злитка виявлена фаза  $CuAl_2$ . Розподіл включень  $Al_2O_3$  в злитку нерівномірний. У верхній і середній частинах включення від 20 до 140 мкм займають 20 - 30% площі шліфа, розподілені досить рівномірно (рис. 19 а, в). У бічних частинах злитка (рис. 19 б) вміст включень значно менший, що пояснюється недостатнім рухом розплаву уздовж стінок тигля. У донній області спостерігається скупчення включень по границям зерен, утворення



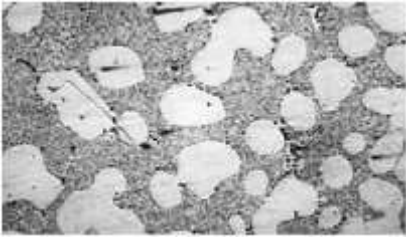


Рис. 20.

Мікроструктура литої міді зі сталевими (09X18) включеннями (х 100): зерна міді (світлі), евтектика  $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$ , по границям зерен міді розташовуються включення  $\text{Cu}_2\text{S}$  (темні).

конгломератів переважно в зонах евтектики (рис. 19 г), що можна пояснити недостатнім перемішуванням в цій зоні. Недостатнє перемішування розплаву по всьому об'єму злитка обумовлене декількома факторами. Неможливість створення достатнього градієнту температур по глибині розплаву за рахунок нагрівання поверхні лазерним променем, оскільки великий енерговклад джерела випромінювання посилює процеси випаровування легкоплавких елементів з розплаву, що призводить до підвищення його в'язкості. Введення в розплав тугоплавких частинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  також збільшує його в'язкість.

Отже, для отримання суспензійного розплаву на основі АК12М2МгН з рівномірно розподіленими у всьому об'ємі частинками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  необхідне використання інших методів введення частинок в розплав.

Введення металевих частинок сталі 09X18 (19% Cr, 1,1% C) в мідь і сплави на основі міді (бронза ОЦС 3-8-6) в газопорошковому потоці під дією лазерного випромінювання через заглиблену фурму №1 дозволяє отримати композиційний злиток з рівномірно розподіленими сталевими включеннями (рис. 20). Мікроструктура литої міді зі сталевими включеннями являє собою твердий розчин міді (світлі зерна), між якими розташовуються зерна колоній евтектики, що складається з міді (основа) і закису міді (темні точки)  $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$  (рис. 20). Фаза  $\text{Cu}_2\text{O}$  з'являється при окисленні міді киснем, який в невеликій кількості розчинений у аргонівій суміші. По границях зерен міді розташовуються, напевно, включення сульфиду міді  $\text{Cu}_2\text{S}$  - темні ланцюжки. Введені частинки сталі рівномірно розподіляються по всьому об'єму литого злитка міді. Більша їх кількість виявлена в донній області (1/3 частина злитка). На відстані 2 - 3 мм від бічних поверхонь злитка сталевих включень не виявлено. Характерним є зміна форми включень при розгляді

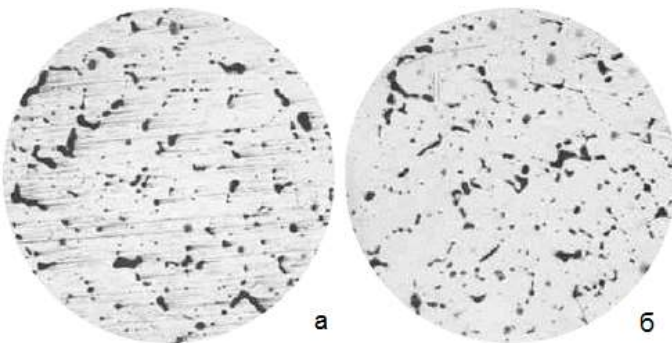


Рис. 21. Розподіл сталевих

включень, введених в розплав бронзи ОЦС 3-8-6 через заглиблені фурму в газолазерному потоці (х 100): а - верхня частина злитка, б - донна частина злитка.

від верхнього рівня до донної частини злитка. Починаючи з верхнього рівня злитка, частинки мають прямокутну або багатогранну форму, а починаючи з середнього рівня, рухаючись до донної частини, включення зустрічаються більш округлої форми або строго овальної. Це може бути свідченням їх підплавлення в розплаві за рахунок лазерного випромінювання.

Для уникнення утворення небажаної фази закису міді у якості матричного матеріалу обрано бронзу ОЦС 3-8-6.

При введенні сталевих включень в розплав бронзи ОЦС 3-8-6 через заглиблену фурму в газопорошковому потоці під дією лазерного випромінюванням отримано найбільш рівномірний їх розподіл у злитку (рис. 21).

Рівномірність розподілу простежується по всьому об'єму злитка, однак, розміри включень у верхній частині трохи більше (рис. 21 а). На поверхні злитка спостерігаються частинки з найбільшою довжиною та шириною. У донній частині кількість частинок збільшується. Вони мають меншу довжину та ширину.

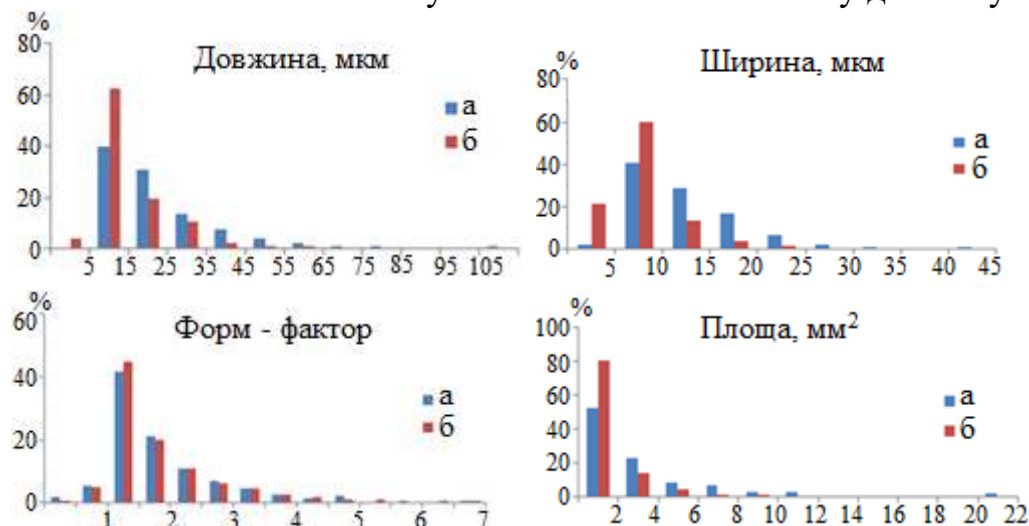


Рис. 22. Геометричні параметри металевих включень, введених в розплав бронзи ОЦС 3-8-6 в верхній (а) та донній (б) частинах злитку.

Зростає кількість включень, форм-фактор яких прямує до значення одиниці, тобто до округлої форми. Площа включень зменшується (рис. 22). Всі ці показники свідчать про вплив лазерного випромінювання на частинки, їх підплавлення, а також інтенсифікацію

масопереносних процесів у розплаві.

Проведені заміри твердості досліджуваних матеріалів: литої бронзи ОЦС 3-8-6, литої сталі 09Х18 та композиту на їх основі (табл.3). Виміри показали, що значення твердості отриманого композиту перевищує твердість сталі марки 09Х18 у 1,2 рази та у 2,6 разів перевищує значення твердості бронзи ОЦС 3-8-6.

Проведені випробування композиційних зразків на зношування в режимі сухого тертя зі швидкістю 20 мм/с під навантаженнями: 5,1; 10,7; 15,3 МПа. Порівняльний аналіз зношування композиту та матричних матеріалів (бронзи ОЦС 3-8-6 і литої сталі 09Х18) представлено в таблиці 4. Для зразка зі сталі отримані найбільші значення періоду обкатування та зносу. Встановлено, що даний матеріал можна використовувати при навантаженнях не більше ніж 10,7 МПа. Зразки з литої бронзи ОЦС 3-8-6 можуть витримувати навантаження до 5,1 МПа. Понад це значення вони втрачають свою геометричну форму.

Таблиця 3. Значення твердості вихідних матеріалів та композита на їх основі.

Твердість, НВ		
Сталь (18 % Cr)	Бронза ОЦС 3-8-6	Композит бронза-сталь
230	107	280

Зразки композиційного матеріалу при навантаженні 5,1 МПа мають таку ж зношувальність, як і сталеві, однак, загальна

втрата маси пари тертя композит - контртіло менше, ніж у пари сталь - контртіло за рахунок втрати маси контр тіла. При збільшенні навантаження до 10,7 МПа втрати маси зразків композиту, контртіла та сумарної маси пари тертя зменшуються, що забезпечується мастильною дією бронзи. Із подальшим зростанням навантаження до 15,3 МПа втрати маси композиційних зразків, контртіла та сумарної маси пари тертя зростають не значним чином, що свідчить про високу зносостійкість композиційного матеріалу.

Таблиця 4. Значення зносостійкості вихідних матеріалів та композита на їх основі.

Втрата маси при сухому терті після 8-ми годинного зношування, г				
Навантаження	Об'єкт зношування	Досліджуваний матеріал		
		Сталь 09Х18	Бронза ОЦС 3-8-6	Композит бронза-сталь
Р = 5,1 МПа	Контр тіло	0,035	0,017	0,025
	Дослідж. матеріал	0,05	0,16	0,05
	Пара тертя	0,085	0,177	0,075
Р = 10,7 МПа	Контр тіло	0,05		0,01
	Дослідж. матеріал	0,075		0,015
	Пара тертя	0,125		0,025
Р = 15,3 МПа	Контр тіло			0,013
	Дослідж. матеріал			0,02
	Пара тертя			0,033

Отриманий композитний матеріал має підвищену зносостійкість порівняно як з литою бронзою, так і литою сталлю 09Х18.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі літературних даних встановлено, що дисперсійно – зміцнені композиційні матеріали мають ряд переваг у порівнянні з іншими композитами (волокнистими, шаруватими), такі як: можливість застосування широкої номенклатури матеріалів, які використовуються в якості основи та зміцнюючої фази; невеликий вміст дисперсної фази у матриці; ізотропія властивостей композиту; високі показники жароміцності та опору повзучості аж до температури плавлення матриці. Рідиннофазні методи отримання композитів мають перевагу над іншими методами з огляду на їх високу продуктивність, можливість механізації, отримання виробів складної конфігурації з мінімальною наступною обробкою або без неї з обмеженим силовим впливом на крихкі компоненти.

2. Дисперсійно – зміцнені литі композити з рівномірно розподіленою фазою у металевій матриці переважно отримувати на основі суспензійних та емульсійних розплавів.

3. Розроблено та досліджено конструкції лазерних фурм, які дозволяють формувати газопорошковий потік з перетяжкою як всередині фурми, так і на виході з неї. Для вивчення розподілу частинок у перерізі двофазного потоку запропоновано

універсальний параметр стану газопорошкового потоку – миттєва об'ємна концентрація порошкового матеріалу. Виявлено, що при застосуванні фурм з односторонньою подачею порошку миттєва об'ємна концентрація частинок  $\beta_f$  у перетяжці перевищує початкове значення  $\beta_{\text{поч}}$  порошку ( $\beta_f \geq \beta_{\text{поч}}$ ), який подається. Двостороння подача із закручуванням потоку сприяє кращому розпиленню порошку по поверхні розплаву, яка розташована перпендикулярно площині подачі порошку, при цьому спостерігається два пікових значень миттєвої об'ємної концентрації дисперсного матеріалу, які формуються після області перетяжки. При двосторонній подачі газопорошкового потоку із закручуванням або без нього  $\beta_f < \beta_{\text{поч}}$ .

4. Визначено зони підвищеної турбулентності газових потоків для розглянутих конструкцій фурм. Встановлено, що збільшення діаметру частинок порошку та їх густини призводить до збільшення кінетичної енергії турбулентних потоків.

5. На основі розробленої математичної моделі визначено вплив швидкості газопорошкового потоку на зміну форми та глибини газових каверн у рідині (розплавах) для різних конструкцій фурм. При значеннях швидкості потоку 5..25 м/с глибина каверн може змінюватися у межах 0,5..4 см. При зміні геометрії фурми шляхом її видовження із закручуванням потоку можна досягати швидкості потоку 200 м/с та глибини каверни 12 см.

6. Встановлено, що оптимальне значення заглиблення лазерних фурм у алюмінієві та мідні розплави становить 15 .. 20 мм. Нижче цієї межі утворюється широка каверна недостатньої глибини; заглиблення фурми понад 20 мм призводить до зменшення як глибини, так і ширини каверни.

7. Визначено, що введення металевих і неметалевих частинок з початковою швидкістю 15..25 м/с в сплави без заглиблення фурми забезпечує їх занурення до моменту досягнення ними швидкості осадження  $v_{\text{ос}}$  (або  $v = 0$  у випадку наступного спливання частинок) на глибину не більше 4 мм. Тому для введення частинок у мідні сплави на більші глибини необхідно застосування методу заглиблення фурм у розплав.

8. Встановлено, що при формуванні суспензій/емульсій на основі алюмінієвих розплавів частинки осаджуються зі швидкістю 0,3..5,5 см/с, отже, для різних умов формування композиту можливо подавати частинки в газопорошковому потоці як на поверхню розплаву, так і за допомогою заглиблення фурми у розплав.

9. Доказано, що глибинна газолазерна обробка металевих розплавів на основі алюмінію та міді сприяє інтенсифікації дифузійних та масопереносних процесів у рідкому металі, перерозподілу елементів у фазах, що забезпечує структурно-фазові зміни у всьому об'ємі сплаву та призводить до підвищення його фізико-механічних властивостей.

10. Дія лазерного випромінювання на композити, отримані шляхом механічного замішування частинок у розплав, забезпечує інтенсивне перемішування розплаву та зміну його структурного стану, впливає на стан між фазних границь розплав – включення. Зміна стану поверхневого шару частинок знижує коалесценцію частинок у розплаві, сприяє їх рівномірному розподілу в об'ємі.

11. При застосуванні незаглиблених фурм спостерігається нерівномірний розподіл включень по глибині злитка з огляду на недостатнє перемішування розплаву у донній частині.

12. Формування композиційних матеріалів на основі мідних і алюмінієвих розплавів шляхом заглиблення фурми із застосуванням лазерного випромінювання забезпечує рівномірний розподіл металевих та неметалевих частинок у структурі сплаву.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лихошва В.П., Марковский Е.А., Рейнталь Е. А. Лазерное облучение металлических расплавов // Металл и литье Украины. – 2007. - № 11-12. – С. 24-26. *Дисертантом виконані дослідження впливу лазерної обробки металевого сплаву АК12М2МГН в рідкому та рідко-твердому стані.*

2. Лихошва В. П., Найдек В. Л., Рейнталь Е. А., Шатрава А. П., Бондарь Л. А. Моделирование процессов формирования суспензионных расплавов // Процессы литья. – 2009. – №3. - С. 11-14. *Дисертантом встановлені залежності об'ємної витрати суспензій при їх формуванні у реакторі змішування від витрати прискорюючого потоку газу та кутової швидкості реактора змішування.*

3. Лихошва В. П., Найдек В. Л., Рейнталь Е. А., Шатрава А. П., Бондарь Л. А., Самотугин С. С. Теплообмен в системе взаимодействия двухфазного газолазерного потока с мишенью // Процессы литья. – 2009. - №4. – С 63 – 68. *Дисертантом запропоновано метод розрахунку температури нагріву дисперсійної частинки та встановлено залежність перерозподілу лазерної енергії між складовими композиту від запиленості газопорошкового потоку.*

4. Найдек В. Л., Лихошва В. П., Рейнталь Е. А., Кирчу Ф. И., Шатрава А. П., Бондарь Л. А., Сердобольская В. П., Тимошенко А. Н. Распределение дисперсных частиц в двухфазном газолазерном потоке // Металл и литье Украины. – 2009. - №№ 11, 12. – С. 4-7. *Дисертантом наведені експериментальні результати досліджень формування газопорошкових потоків газолазерними фурмами різних конструкцій.*

5. Лихошва В. П., Рейнталь Е. А., Кирчу Ф. И., Шатрава А. П., Бондарь Л. А., Тимошенко А. Н. Моделирование газолазерных потоков при создании оборудования для нагревания дисперсных материалов // Металл и литье Украины. – 2009. - №№ 11, 12. – С. 77-81. *Дисертантом розроблена математична модель для встановлення експлуатаційних характеристик газолазерних фурм.*

6. Лихошва В. П., Рейнталь Е. А., Бондарь Л. А., Тимошенко А. Н., Угрин Л. Е. Воздействие газовых потоков, подаваемых с помощью фурмы, на жидкие среды // Процессы литья. – 2010.- № 6.- С.64-71. *Дисертантом запропоновано математичну модель формування газових каверн у рідині.*

7. Рейнталь Е.А., Лихошва В.П., Савин В.В., Бондарь Л.А., Тимошенко А.Н., Надашкевич Р.С. Изменение газовой каверны при погружении фурм различных конструкций в жидкие среды // Процессы литья. – 2011.- № 3.- С.14-23. *Дисертантом розглянуті процеси формування каверн при заглибленні газових потоків у рідкі середовища.*

8. Лихошва В.П., Тимошенко А.Н., Рейнталь Е.А., Бондарь Л.А. Форма свободной поверхности жидкости в реакторах смешения в условиях наложения механического и пневматического воздействия // Процессы литья. – 2012.- № 5.- С.25-32. *Дисертантом розглянуті питання стану та поведінки рідини в різних реакторах змішування.*

9. Лихошва В.П., Рейнталь Е.А., Бондарь Л.А., Тимошенко А.Н. Моделирование динамики движения частицы на границе газ-жидкость и в жидких средах // Процессы литья. – 2012. – №6. – С. 65-71. *Дисертантом надано технологічні рекомендації щодо застосування методів формування суспензій/емульсій на основі алюмінієвих та мідних сплавів з введенням керамічних та металевих частинок.*

10. Лихошва В.П., Тимошенко А.Н., Рейнталь Е.А., Бондарь Л.А. Новые гибридные методы формирования суспензионных расплавов в литейном производстве с применением лазерной обработки // Заготовительные производства в машиностроении. - 2014. – № 3. – С.3 – 8. *Дисертантом розглянуті процеси неперервного формування суспензійного розплаву в реакторах змішування. (Іноземне видання.)*

11. Лихошва В.П., Рейнталь Е.А., Бондарь Л.А. Воздействие заглубленного газового потока на металлические расплавы // Заготовительные производства в машиностроении. - 2014. – № 7. – С.3 – 6. *Дисертантом досліджено вплив величини заглиблення газолазерної фурми у розплави на глибину газових каверн. (Іноземне видання.)*

12. Savin V.V., Reintal E. A., Likhoshva V.P., Timoshenko A. N., Osadchy A.V., Savina L.A. Mathematical modelling of continuous laser welding and local heat treatment of welded pipes of stainless and heat-resistant chromium-nickel steels // Beam Technologies and Laser Application. - IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1109 (2018) 012003 (8P) doi:10.1088/1742-6596/1109/1/012003. ISSN 1742-6596. *Дисертантом досліджено вплив локальної дії лазерного випромінювання на нержавіючі аустенітні сталі. (Іноземне видання, яке входить до наукометричної бази даних Scopus).*

13. Рейнталь О. О Лихошва В.П., Тимошенко А.Н., Клименко Л. М. Литі композиційні матеріали на основі мідних сплавів // Метал та лиття України. – 2020. - №3. – С. 30-35. *Дисертантом проведені дослідження способів отримання литого композиту на основі мідних сплавів шляхом формування суспензійного розплаву з використання дії лазерного випромінювання.*

14. Лихошва В.П., Афтандіянц Є.Г., Рейнталь О.О., Надашкевич Р.С., Тимошенко А.М., Головка Л.Ф., Шатрава О.П. Спосіб отримання композиційних матеріалів. Патент на корисну модель UA № 72692, МПК C22C1/02 (2006.01), 2012. *Дисертантом зареєстровано патент на корисну модель способу отримання композиційних матеріалів при подачі газових суспензій у розплав із застосування лазерного випромінювання.*

15. Лихошва В. П., Афтандіянц Є. Г., Рейнталь О. О., Тимошенко А. М., Головка Л. Ф. Пристрій для лазерної обробки. Патент на корисну модель UA №

79754, МПК В23К 26/14 (2006.01), В22D19/00, 2013. *Дисертантом зареєстровано патент на корисну модель пристрою для подачі та лазерної обробки дисперсійного матеріалу.*

16. Лихошва В. П., Афтанділянц Є. Г., Рейнталь О. О., Тимошенко А. М., Головка Л. Ф. Пристрій для отримання композиційних матеріалів. Патент на корисну модель UA № 81108, МПК В22D19/00, В22D19/14 (2006.01), 2013. *Дисертантом зареєстровано патент на корисну модель пристрою для отримання композиційного матеріалу.*

17. Лихошва В. П., Афтанділянц Є. Г., Рейнталь О. О., Тимошенко А. М., Головка Л. Ф. Спосіб отримання композиційних матеріалів. Патент на корисну модель UA № 82839, МПК В22D19/14 (2006.01), С22С1/02, 2013. *Дисертантом зареєстровано патент на корисну модель способу отримання композиційних матеріалів шляхом подачі рідиннофазної суспензії у розплав під дією лазерного випромінювання.*

18. Рейнталь Е. А., Бондарь Л. А. Моделирование процессов формирования суспензионных расплавов под воздействием лазерного излучения // Тезисы международной научно-технической конференции «Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства». Украинский морской институт. – Севастополь, 26-29 августа 2008. – С. 100-102. *Дисертантом розглянуто метод формування суспензійних розплавів у реакторі змішування.*

19. Лихошва В. П., Рейнталь Е. А. Фурмы для заглубления газолазерных и газопорошковых струй в жидкость // Тезисы международной научно-технической конференции «Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкций». – Севастополь, 25-28 августа 2010. – С.6 – 10. *Дисертантом наведені результати математичного моделювання утворення газових каверн у рідких середовищах фурмами різних конструкцій.*

20. Шатрава А. П., Лихошва В. П., Рейнталь Е. А., Бондарь Л. А. Некоторые особенности прогнозирования параметров упрочненных слоев при лазерной обработке рабочих органов дробильно-размольных машин // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Литье-2011». – Запорожье, 2011. - Том 1.- С.219-220. *Дисертантом наведені результати обчислення оптимальних параметрів лазерного поверхневого зміцнення органів дробильно-розмельних машин.*

21. Рейнталь Е. А. Фокусировка газопорошковых потоков в лазерных фурмах // Тезисы международной научно-технической конференции «Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкций». – Севастополь, 25-28 августа 2011. – С. 49 – 52. *Дисертантом запропоновано параметр миттєвої об'ємної концентрації порошкового матеріалу для аналітичного визначення перетяжки порошкового потоку.*

22. Рейнталь Е. А., Лихошва В. П., Бондарь Л. А. Оценка глубины формирования композиционного слоя на основе металлических суспензий // Тезисы международной научно-практической конференции-выставки «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология». –



Київ, 12-14 декабля 2011. – С.232 – 234. *Дисертантом запропоновано математичну модель динаміки руху дисперсійних частинок.*

### АНОТАЦІЯ

**Рейнталь О. О. Процеси формування суспензійних та емульсійних розплавів при введенні дисперсійних частинок під дією лазерного випромінювання. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розробці нового методу отримання литих металевих дисперсійно-зміцнених композиційних матеріалів шляхом формування суспензійних та емульсійних розплавів на основі кольорових сплавів керованим введенням у металеву матрицю металевих та керамічних частинок у газопорошковому потоці, нагрітих лазерним випромінюванням. Для реалізації методу було розроблено технологічне обладнання та досліджено процеси подачі дисперсійного матеріалу в зону обробки лазерним променем. Проведено ряд експериментальних та теоретичних досліджень стосовно підбору гідро-, газодинамічних та теплових умов формування суспензійних та емульсійних розплавів. Отримано литі композиційні матеріали на основі алюмінієвого сплаву АК12М2МГН з неметалевими включеннями  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiC}$  та  $\text{FeS}$  та композити на основі міді та бронзи ОЦС 3-8-6 із сталевими включеннями 09Х18.

**Ключові слова:** металевий композиційний матеріал, дисперсійно-зміцнений, дисперсійна частинка, газолазерний потік, лазерна обробка, газова каверна, газолазерна фурма, миттєва об'ємна концентрація.

### АННОТАЦИЯ

**Рейнталь Е. А. Процессы формирования суспензионных и эмульсионных расплавов при введении дисперсионных частиц под действием лазерного излучения. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.07 - Процессы физико-технической обработки. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа посвящена разработке нового метода получения литых металлических дисперсно-упрочненных композиционных материалов путем формирования суспензионных и эмульсионных расплавов на основе цветных сплавов управляемым введением в металлическую матрицу металлических и керамических частиц в газопорошковом потоке, нагретых лазерным излучением. Для реализации метода были разработано технологическое оборудование и исследованы процессы подачи дисперсного материала в зону обработки лазерным лучом. Проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований по подбору гидро-, газодинамических и тепловых условий формирования суспензионных и



эмульсионных расплавов. Получены литые композиционные материалы на основе алюминиевого сплава АК12М2МгН с неметаллическими включениями  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiC}$  и  $\text{FeS}$  и композиты на основе меди и бронзы ОЦС 3-8-6 со стальными включениями 09Х18.

**Ключевые слова:** металлический композиционный материал, дисперсно-упрочненный, дисперсная частица, газолазерной поток, лазерная обработка, газовая каверна, газолазерная фурма, мгновенная объемная концентрация.

## ABSTRACT

Reintal O.O. "Processes of formation of suspension and emulsion melts at introduction of dispersion particles under the action of laser radiation. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.03.07 - Processes of physical and technical processing – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the development of a new method for obtaining cast metal dispersion-strengthened composite materials by forming suspension and emulsion melts based on non-ferrous alloys by controlled introduction into a metal matrix metal and ceramic particles in a gas-powder flow heated by laser radiation. To implement the method, technological equipment was developed and the processes of feeding dispersed material into the zone of laser beam processing were studied.

The influence of the design of laser powder supplying tuyeres on the geometric parameters of gas cavities in melts, the velocity of gas-powder flows, the change in the initial volumetric concentration of the powder flow and the position of its waist is investigated.

A number of experimental and theoretical studies have been carried out on the selection of hydro-, gas-dynamic and thermal conditions for the formation of suspension and emulsion melts based on aluminum and copper alloys.

Two methods have been tested for feeding dispersed material into melts by transporting them with a gas flow to the surface of the melt and by deepening a laser tuyere into the melt.

The data of the gas flows rates, the rates of sedimentation or floating up of the dispersed phase in the melt, and the depths of gas cavities made it possible to draw a conclusion about the field of application of each method in the formation of metal suspensions and emulsions.

It is established that when non-metallic particles are fed into aluminum alloys due to their deposition in the melt, it is possible to supply them both to the melt mirror and by deepening the gas laser tuyere into the liquid matrix. When forming a composite material based on copper alloys with metal particles, it is necessary to use the method of deepening

the tuyeres into the melt, because the metal particles float into the surface layers of the melt.

Application of the method of deepening the tuyere in the melt contributes to a more even distribution of the dispersion component throughout the volume of the metal. It is established that the optimal values of the tuyere deepening are 15..20 mm.

The use of laser radiation for heating the dispersed phase and matrix is substantiated. It was found that deep gas laser processing of aluminum alloy AK12M2MgN leads to grinding of the structure and its more uniform distribution. The change in the phase composition of the main and other components of the phases is expressed in the increase in the content of silicon, manganese, copper and zinc in the main phase, which affects the hardness of the alloy by 1.3 times compared to the raw alloy.

The introduction of non-metallic  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  particles into the AK12M2MgN melt through a deep tuyere in the absence of laser radiation leads to a visible expansion of the grain boundaries, and in some places - microcracks. When introducing non-metallic particles through a recessed tuyere using laser radiation, the distribution of inclusions in the structure of the alloy is uniform.

Cast composite materials based on the AK12M2MgN aluminum alloy with non-metallic inclusions  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiC and FeS and composites based on copper and bronze TZL 3-8-6 with steel inclusions 09X18 were obtained.

Composite material based on bronze TZL 3-8-6 with introduced particles of steel grade 09X18, obtained by deep gas laser treatment, has increased wear properties (reduced wear compared to samples of bronze TZL 3-8-6 and steel grade 09X18) and hardness (exceeds the hardness of 09X18 steel by 1.2 times and 2.6 times exceeds the value of bronze hardness TZL 3-8-6).

**Key words:** metal composite material, dispersion-hardened, dispersion particle, gas laser flow, laser treatment, gas cavity, gas-laser tuyere, instantaneous volume concentration.